

Сканирующая зондовая микроскопия для исследований сегнетоэлектрических свойств микро- и наноструктур

В.А. Быков^{1,2}, Ан.В. Быков¹, Ю.А. Бобров¹, А.С. Калинин, В.В. Котов¹, С.И. Леесмент¹, В.В. Поляков¹, С.В. Тимофеев¹

¹НТ-МДТ Спектрум Инструментс, Москва, Россия
e-mail: vbykov@ntmdt-si.com

²Московский физико-технический институт, Москва, Россия

К настоящему времени методами сканирующей зондовой микроскопии можно эффективно изучать физико-химические, геометрические, электрические, пьезоэлектрические, магнитные параметров поверхностей широкого круга объектов, в том числе, молекулярных объектов, нанотрубок, живых клеток. Кроме топографии высокого пространственного разрешения, сканирующие зондовые микроскопы позволяют измерять целый ряд физических свойств поверхностных структур, в том числе топографические, магнитные, электрические, пьезоэлектрические, адгезионные, оптические и спектральные, а также производить модификацию поверхности.

Для реализации этих возможностей разработаны комбинированные методы, позволяющие одновременно работать в режимах атомно силовой микроскопии, спектроскопии комбинационного рассеяния (Рамановской), люминесцентной спектроскопии, безапертурной ближнепольной микроскопии с возможностью визуализации распределение модулированного вибрирующим зондом рассеянного излучения в видимом, ИК и терагерцовом диапазонах длин волн с разрешением до 10 нм.

В отличие от первых вариантов сканирующих зондовых микроскопов контроллеры приборов базируются на элементной базе с использованием программируемых логических интегральных схем, новых прецизионных операционных усилителей, цифроаналоговых преобразователей, позволяющие создавать приборы с элементами искусственного интеллекта, что существенно снижает требования к уровню пользователя приборов. Уже в настоящее время в функциях приборов введена возможность быстрого, автоматического подбора параметров сканирования в «Теппинг» моде, что делает атомно-силовые микроскопы нашей компании доступными для технологов, материаловедов и, даже, школьников, дает возможность получать высококачественное изображение поверхности.

В новых приборах развита возможность реализации сканирующей зондовой спектроскопии – HybriDTM mode (<https://www.ntmdt-si.ru/products/features/hybrid-mode>), что позволило измерять: рельеф поверхности в режимах притяжения и отталкивания, модуль Юнга, адгезию и работу адгезии, проводимость, латеральный и вертикальный пьезоотклик, распределение температуры и теплопроводности, измерять термоэлектрические свойства, потенциал поверхности, работу выхода, диэлектрическую проницаемость и т.д.

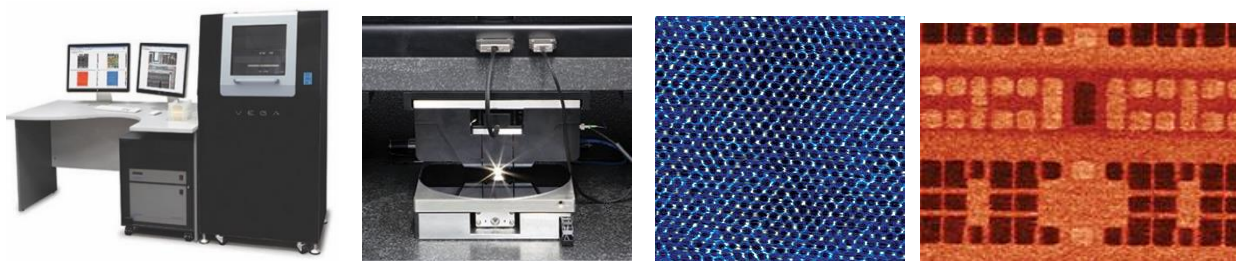


Рисунок 1. Сканирующий зондовый микроскоп БЕГА; 200 мм пластина, атомарное разрешение на HOPG, размер скана 6x6 нм; поверхностный потенциал SRAM, размер скана 2,5x1,6 мкм; (<https://www.ntmdt-si.ru/products/automated-afm/vega>).

Кроме того, становится возможным использование зонда АСМ с более высокой жесткостью и резонансной частотой. Благодаря этому была реализована возможность

двухпроходных резонансных электростатических измерений: Кельвин-зондовая Силовая Микроскопия или Электростатическая Силовая Микроскопия могут использоваться одновременно с измерениями рельефа, адгезии, модуля упругости и исследованиями пьезоотклика.

Перечисленные возможности реализованы в сканирующих зондовых системах NTEGRA (US Patent of Trademark - № 5,926,648 от 03.12.2019).

Сканирующая многофункциональная спектроскопия комбинационного рассеяния (Рамановская) в комбинации с ACM (<https://www.ntmdt-si.ru/products/afm-raman-nano-ir-systems/ntegra-spectra-ii>).

Разработка зондов со специальными покрытиями, способными концентрировать оптические плазмоны, позволила создать приборы на основе эффекта гигантского усиления Рамановского рассеяния – создать методы Tip Enhanced Raman Scatterings (TERS).

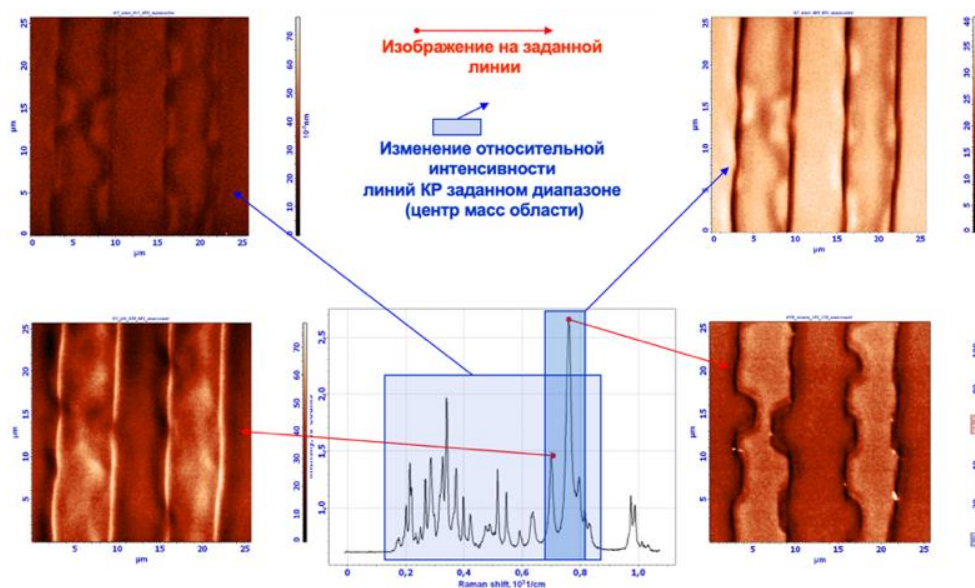


Рисунок 2. Конфокальная Рамановская спектроскопия титанил-фосфата калия (KTiOPO_4) на глубине 500 нм от поверхности образца (а) и конфокальное изображение относительного изменения интенсивности спектра КР в диапазоне 660-740 см^{-1} .

Методика информативна для изучения, в том числе, сегнетоэлектриков, предельно тонких углеродных материалов – графены, углеродные нанотрубки, слоистые полупроводники, а также квантовых точек, нанопроволок и других материалов, активных в комбинационном рассеянии.

Можно уверенно констатировать, что к настоящему времени в России выполнены разработки и организовано производство практически полного, за исключением сверхвысоковакуумных СЗМ, комплекса приборов и методов для исследования микро и наноструктур с использованием сканирующих зондовых микроскопов. Для лабораторий – созданы приборы линии ИНТЕГРА, для системы образования в школах и колледжах – бюджетные, но достаточно мощные НАНОЭДЬЮКАТОРЫ и СОЛВЕР-НАНО, а для исследовательских работ – приборы, кратко описанные в настоящей статье. Следует отметить, что развитие нанoeлектроники, создание новой элементной базы дают возможность дальнейшего совершенствования приборов, все более и более внедрять системы искусственного интеллекта в программное обеспечение с раскрытием возможностей развивающейся элементной базы контроллеров, срок морального старения которых сегодня составляет около 5 лет.